

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

**О.М. Довгалюк, Д.М. Калюжний, Г.М. Сердюкова,
М.Ф. Піскурьов, Т.В. Блощенко.**

**Методичні вказівки
до практичних занять з дисципліни
“Перехідні процеси в енергетичних системах”**

(для студентів 3 і 4 курсу денної та 4 курсу заочної форм навчання
спеціальностей 6.09 06 03 - "Електротехнічні системи електроспоживання"
та 6.05 07 01 - “Електротехніка та електротехнології”)

ХАРКІВ – ХНАМГ – 2008

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни “Перехідні процеси в енергетичних системах” (для студентів 3, 4 курсів денної та 4 курсу заочної форм навчання спеціальностей 6.09 06 03 - “Електротехнічні системи електроспоживання” та 6.0507 01 - “Електротехніка та електротехнології”). Укл.: Довгалюк О.М., Калюжний Д.М., Сердюкова Г.М., Піскульов М.Ф, Блощенко Т.В.. – Харків: ХНАМГ, 2007. – 52 с.

Укладачі: О.М. Довгалюк,
Д.М. Калюжний,
Г.М. Сердюкова,
М.Ф. Піскульов,
Т.В. Блощенко.

Рецензент: доц. кафедри ЕМ Сендерович Г.А.

Рекомендовано кафедрою електропостачання міст,
протокол № 10 від 21.06.2007 р.

ЗМІСТ

Стор.

ВСТУП.....	4
ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ.....	5
ЗАНЯТТЯ 1. Складання еквівалентної схеми заміщення і розрахунок параметрів її елементів	6
ЗАНЯТТЯ 2. Перетворення еквівалентної схеми заміщення	9
ЗАНЯТТЯ 3. Розрахунок діючих значень періодичної складової струму і потужності в точці КЗ для початкового моменту часу	13
ЗАНЯТТЯ 4. Розрахунок діючого значення періодичної складової струму для довільного моменту часу за методом розрахункових кривих	18
ЗАНЯТТЯ 5. Розрахунок діючого значення періодичної складової струму для довільного моменту часу за методом типових кривих.....	25
ЗАНЯТТЯ 6. Розрахунок діючого значення періодичної складової струму КЗ для сталого режиму ($I_{п\infty}$).....	32
ЗАНЯТТЯ 6. Розрахунок миттєвого значення аперіодичної складової струму в точці КЗ для заданого моменту часу	36
ЗАНЯТТЯ 7. Визначення миттєвого і діючого значень ударного струму КЗ	39
ЗАНЯТТЯ 9. Визначення діючого значення періодичної складової струму в місці несиметричного КЗ для моменту часу t , методом спрямлених характеристик	42
ЗАНЯТТЯ 10. Визначення діючого значення періодичної складової струму в заданому перетині й напруги в заданому вузлі для моменту часу t , побудова векторних діаграм.....	50
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	51

ВСТУП

Дані методичні вказівки призначені для використання викладачами при проведенні практичних занять з курсу “Перехідні процеси в енергетичних системах” і можуть бути корисні студентам при виконанні розрахунків струмів короткого замикання (КЗ).

Методичні вказівки містять у собі практичні методи і порядок розрахунку струмів симетричних і несиметричних КЗ, а також табличні й графічні залежності, необхідні при інженерних розрахунках електромагнітних перехідних процесів.

При розрахунках струмів короткого замикання допускається:

- 1) не враховувати зрушення по фазі ЕРС різних синхронних машин і зміну їхньої частоти обертання, якщо тривалість КЗ не перевищує 0,5с;
- 2) не враховувати міжсистемні зв'язки, виконані за допомогою електропередачі постійного струму;
- 3) не враховувати поперечну ємність повітряних ліній електропередачі напругою 110-220 кВ, якщо їх довжина не перевищує 200 км, і напругою 330-500кВ, якщо їх довжина не перевищує 150 км;
- 4) не враховувати насичення магнітних систем електричних машин;
- 5) не враховувати струми намагнічування трансформаторів і автотрансформаторів;
- 6) не враховувати вплив активних опорів різних елементів вихідної розрахункової схеми на амплітуду періодичної складової струму КЗ, якщо активна складова результуючого еквівалентного опору розрахункової схеми відносно точки КЗ не перевищує 30 % від індуктивної складової результуючого еквівалентного опору;
- 7) наближено враховувати загасання аперіодичної складової струму КЗ, якщо вихідна розрахункова схема містить кілька незалежних контурів.

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

Відповідно до навчальної програми з курсу “Перехідні процеси в енергетичних системах” заплановано 46 годин аудиторних практичних занять для денної форми навчання і 12 годин – для заочної форми навчання.

Перелік цих занять наведений нижче.

Заняття 1. Складання еквівалентної схеми заміщення і розрахунок параметрів її елементів.

Заняття 2. Перетворення еквівалентної схеми заміщення.

Заняття 3. Розрахунок діючих значень періодичної складової струму в точці КЗ для початкового моменту часу.

Заняття 4. Розрахунок діючого значення періодичної складової струму для довільного моменту часу за методом розрахункових кривих.

Заняття 5. Розрахунок діючого значення періодичної складової струму для довільного моменту часу за методом типових кривих.

Заняття 6. Розрахунок діючого значення періодичної складової струму КЗ для сталого режиму.

Заняття 7. Визначення миттєвого й діючого значень ударного струму КЗ.

Заняття 8. Визначення діючого значення періодичної складової струму в місці несиметричного КЗ для моменту часу t , методом спрямлених характеристик.

Заняття 9. Визначення діючого значення періодичної складової струму в заданому перерізі й напруги в заданому вузлі для моменту часу t , побудова векторних діаграм.

ЗАНЯТТЯ 1. Складання еквівалентної схеми заміщення і розрахунок параметрів її елементів

Схему заміщення складають на основі розрахункової схеми електричної системи. Приклад розрахункової схеми наведено на рис. 1.1.

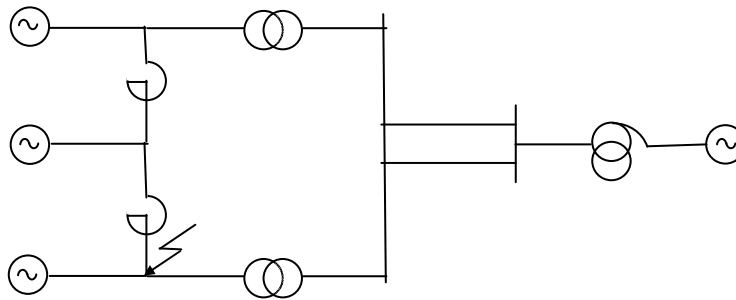


Рис. 1.1 – Розрахункова схема електричної системи

Кожен опір елемента схеми заміщення позначається у вигляді дроби – у чисельнику вказують порядковий номер опору, у знаменнику – величина опору (рис.1.2).

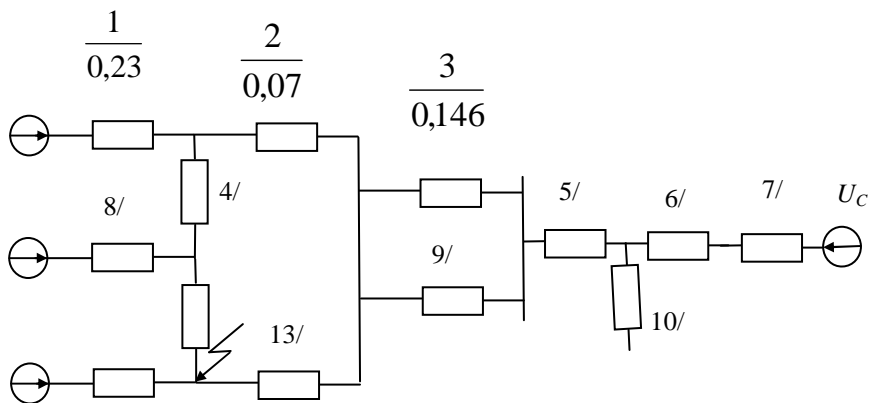


Рис. 1.2 – Схема заміщення електричної системи

Розрахунок параметрів елементів еквівалентної схеми заміщення в мережах вище 1кВ рекомендують здійснювати у відносних одиницях (в.о.) за формулами наближеного приведення. Довільно задають базисну потужність S_6 (МВА) і базисну напругу U_6 (кВ). Рекомендують прийняти $S_6=100$ МВА,

$U_{\delta} = U_{\text{ср}}$ – рівним середній напрузі ступені.

Середню напругу для ступені визначають відповідно до наступної шкали: 1115; 770; 515; 340; 230; 154; 115; 37; 27; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15 (кВ) [1].

Розрахунок опорів елементів схеми заміщення, приведених до ступені КЗ, обчислюють за формулами
опір генератора:

$$\overset{\circ}{x}_{*T} = \dot{x}_{*T} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}}; \quad (1.1)$$

опір двохобмоткового трансформатора:

$$\overset{\circ}{x}_{*T} = \frac{u_{\text{к}} \%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}}; \quad (1.2)$$

опір триобмоткового трансформатора або автотрансформатора

$$\overset{\circ}{x}_{*TB} = \frac{u_{\text{кВ}} \%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}}; \quad \overset{\circ}{x}_{*TC} = \frac{u_{\text{кС}} \%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}}; \quad \overset{\circ}{x}_{*TH} = \frac{u_{\text{кН}} \%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}}, \quad (1.3)$$

де

$$u_{\text{кВ}} \% = 0,5(u_{\text{кВ-С}} + u_{\text{кВ-Н}} - u_{\text{кС-Н}}) \%;$$

$$u_{\text{кС}} \% = 0,5(u_{\text{кВ-С}} + u_{\text{кС-Н}} - u_{\text{кВ-Н}}) \%;$$

$$u_{\text{кН}} \% = 0,5(u_{\text{кВ-Н}} + u_{\text{кС-Н}} - u_{\text{кВ-С}}) \%.$$

Якщо напруга КЗ будь-якої з обмоток виходить рівною нулю чи менше нуля, то опір відповідної обмотки трансформатора приймають рівним нулю.

Опір реактора

$$\overset{\circ}{x}_{*p} = \frac{x_p \%}{100} \frac{I_{\delta}}{I_{\text{ном}}} \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ср}}}, \quad (1.4)$$

де $U_{\text{ср}}$ – середня напруга ступіні, на якій встановлений реактор,
опір лінії

$$\overset{\circ}{x}_{*\text{л}} = x_{\text{уд}} \frac{l}{n} \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср}}^2}; \quad (1.5)$$

опір навантаження

$$\overset{\circ}{x}_{*\text{нагр}} = \overset{\bullet}{x}_{*\text{нагр}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}}; \quad (1.6)$$

опір системи

при відомій потужності короткого замикання:

$$\overset{\circ}{x}_{*\text{с}} = \frac{S_{\text{б}}}{S''}; \quad (1.7)$$

при відомій номінальній потужності й відносному опорі

$$\overset{\circ}{x}_{*\text{с}} = x_{*\text{с}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}}; \quad (1.8)$$

при відомій номінальній напрузі й опорі в іменованих одиницях

$$\overset{\circ}{x}_{*\text{с}} = x_{\text{с}} \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2}; \quad (1.9)$$

для системи нескінченної потужності $\overset{\circ}{x}_{*\text{с}} = 0$.

Примітки:

Індекси, використані в попередніх формулах, означають:

“о” – значення, приведені до основної ступені напруги (ступені КЗ) і до базисних умов;

“*” – відносне значення;

“•” – значення, приведені до номінальних умов.

Розрахунки виконувати з точністю до другого десяткового знака для значень >1 , або до третього знака для значень <1 .

ЗАНЯТТЯ 2. Перетворення еквівалентної схеми заміщення

Для обчислення струму в місці короткого замикання складену схему заміщення необхідно згорнути (спростити) щодо точки КЗ до вигляду

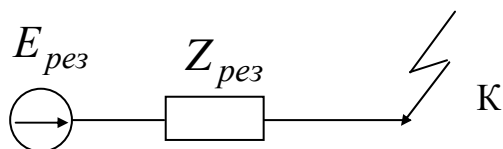


Рис. 2.1 – Спрощена схема заміщення електричної системи

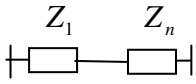
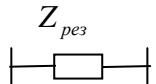
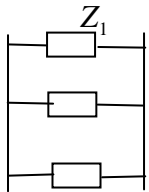
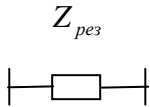
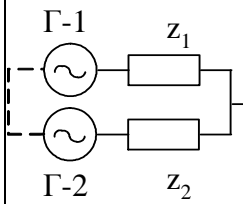
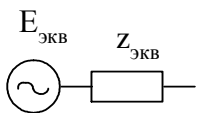
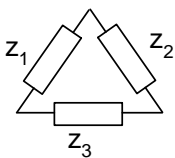
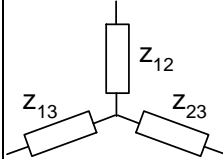
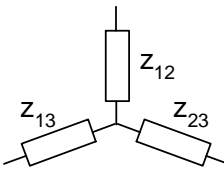
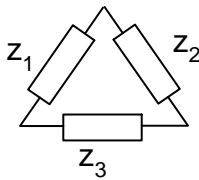
В окремому випадку, коли схема заміщення не містить замкнутих контурів і в ній є одне чи кілька джерел з однаковими ЕРС, її можна привести до найпростішого вигляду шляхом послідовного і рівнобіжного додавання елементів. У загальному випадку для такого спрощення використовують ряд додаткових перетворень. До них відносяться перетворення трикутника в зірку чи назад, заміна галузей, що генерують, з різними ЕРС, приєднаних до загального вузла, однієї еквівалентної. Формули таких перетворень наведені в табл. 2.1.

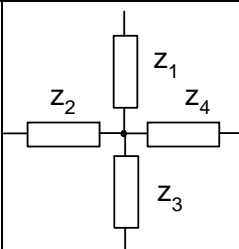
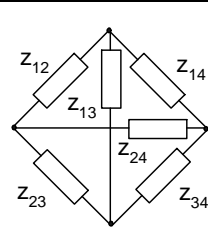
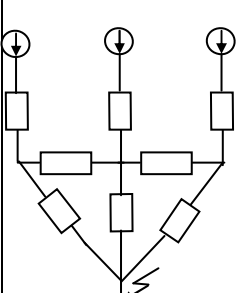
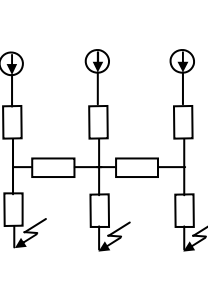
Рекомендації, якими слід керуватися при перетворенні схем заміщення:

1. Аварійну гілку слід зберегти до кінця перетворення, тому що завданням розрахунку струму КЗ є визначення струму безпосередньо в цій аварійній гілці чи в місці КЗ.

2. Якщо трифазне КЗ відбувається у вузлі, в якому сходяться кілька гілок, то схему можна розрізати по цьому вузлу, зберігши умову КЗ на кінці кожної з гілок.

Таблиця 2.1 – Основні формули перетворення схем заміщення

Перетворення	Схема до перетворення	Схема після перетворення	Опори елементів схеми після перетворення
1	2	3	4
Послідовне			$Z_{рез.} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$
Паралельне			$Z_{рез.} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n 1/Z_i}$ Для двох гілок $Z_{рез} = \frac{Z_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}$
Заміна декількох джерел одним			$E_{экв} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}}$ $Z_{экв} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}}$
Перетворення трикутника в зірку			$Z_1 = \frac{Z_{12} Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}$ $Z_2 = \frac{Z_{12} Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}$ $Z_3 = \frac{Z_{23} Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}$
Перетворення зірки в трикутник			$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}$ $Z_{13} = Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2}$ $Z_{23} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_1}$

1	2	3	4
Перетворення зірки в багатокутник			$z_{12} = z_1 \cdot z_2 \cdot \sum_{i=1}^4 Y_i$ $z_{13} = z_1 \cdot z_3 \cdot \sum_{i=1}^4 Y_i$ $z_{14} = z_1 \cdot z_4 \cdot \sum_{i=1}^4 Y_i$
Розріз мережі в точці КЗ			

Далі отриману схему необхідно перетворити щодо кожної з точок КЗ, з огляду на інші гілки з КЗ як звичайні навантажувальні гілки з ЕРС, рівними нулю. Струм КЗ знаходять як суму струмів аварійних гілок.

3. Використовувати симетрію схеми відносно точки КЗ або іншої точки.

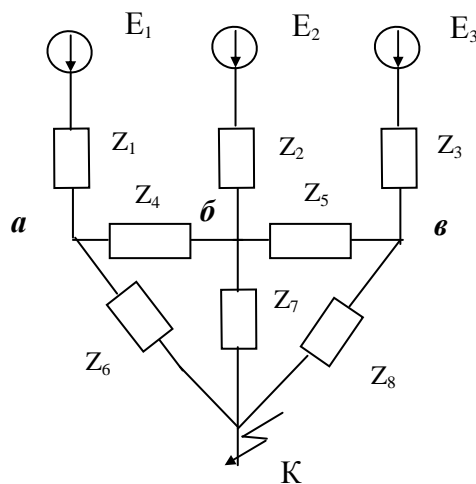


Рис. 2.2 – Схема заміщення електричної системи

Нехай $E_1 = E_3$, $Z_1 = Z_3$, $Z_4 = Z_5$, $Z_6 = Z_8$, тоді схема має часткову симетрію щодо елементів Z_2, Z_7 . Потенціали вузлів *a* і *в* будуть однаковими і їх можна за-

коротити і рівнобіжні гілки, що утворилися Z_1 та Z_3 , Z_4 та Z_5 , Z_6 та Z_8 , замінити еквівалентними.

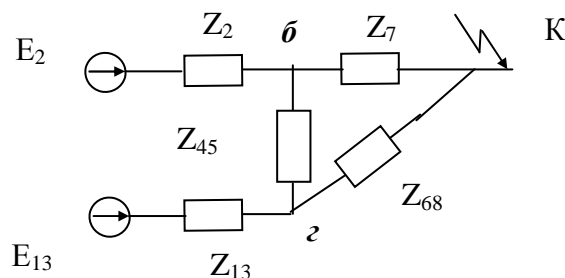


Рис. 2.3 – Спрощена схема заміщення електричної системи

Замість двох контурів схема тепер містить один контур, перетворивши який в еквівалентну зірку схема легко приводиться до елементарного вигляду.

Якщо генеруючі гілки E_1 , E_2 і E_3 однакові, а також однакові елементи Z_6 , Z_7 і Z_8 , то наявність елементів Z_3 і Z_4 не впливає на величину струму КЗ. Схема в цьому випадку матиме наступний вигляд:

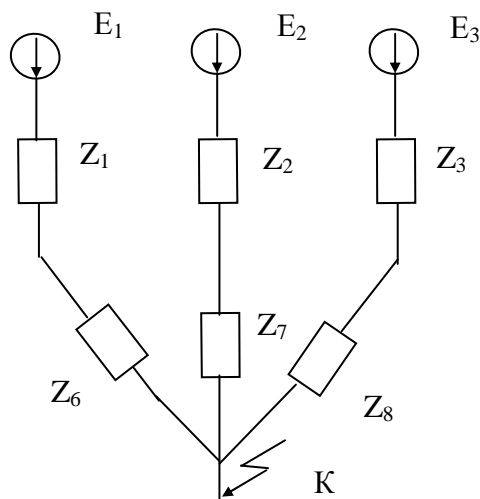


Рис. 2.4 – Спрощена схема заміщення електричної системи

У загальному випадку, коли елементи схеми різні, для її спрощення можна одну з трипроменевих зірок з елементами 1, 4, 6 чи 3, 5, 8 замінити еквівалентним трикутником, потім розрізати його вершину, де прикладена ЕРС, і рівнобіжні гілки, що утворилися (2 і 10, 7 і 9), замінити еквівалентними.

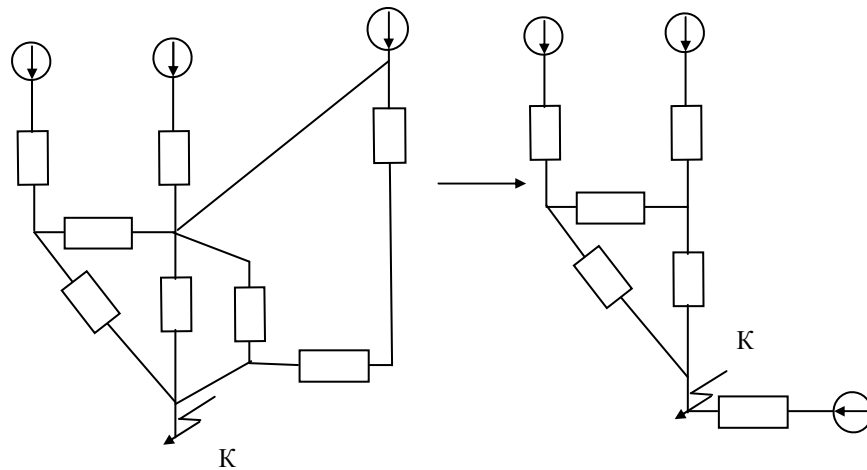


Рис. 2.5 – Спрощення схеми заміщення електричної системи

Ще одне перетворення трикутника, що залишився, у зірку з наступним рівнобіжним і послідовним додаванням гілок швидко приведе до досягнення мети.

При згортанні схеми заміщення в розрахунках варто приводити всі проміжні схеми перетворення, позначаючи нові опори зростаючими порядковими номерами.

ЗАНЯТТЯ 3. Розрахунок діючих значень періодичної складової струму і потужності в точці КЗ для початкового моменту часу

При розрахунку початкового діючого значення періодичної складової струму трифазного КЗ в електроустановках напругою понад 1кВ у вихідній розрахунковій схемі повинні бути задані всі синхронні генератори і компенсатори, а також потужне навантаження, якщо між ним і точкою КЗ відсутні струмообмежуючі реактори чи силові трансформатори.

Порядок розрахунку:

1) Для заданої розрахункової схеми електричної системи скласти схему заміщення, в якій синхронні генератори і електродвигуни враховуються своїми

понадперехідними параметрами, тобто ЕРС - E''_q і опором x''_d .

За відсутності необхідних даних можна скористатися середніми відносними значеннями E'' , x'' , наданими в табл. 3.1 [2].

Значення опорів і навантажень генераторів необхідно привести до базисних умов і до основної ступені напруги за формулами (1.1 та 1.6), замінивши в них $\dot{x}_{*Г}$ на x''_d , $\dot{x}_{*нагр}$ на $x''_{нагр}$ відповідно. Значення опорів решти елементів схеми заміщення розраховують за відповідними формулами заняття 1.

Таблиця 3.1. – Параметри елементів електричної мережі

Найменування елемента	E''	x''
Гідрогенератор з демпферною обмоткою	1,13	0,2
Гідрогенератор без демпферної обмотки	1,18	0,27
Турбогенератор потужністю до 100 МВт	1,08	0,125
Турбогенератор потужністю 100-500 МВт	1,13	0,2
Синхронний компенсатор	1,2	0,2
Синхронний двигун	1,1	0,2
Асинхронний двигун	0,9	0,2
Узагальнене навантаження	0,85	0,35

2) Згорнути схему заміщення до найпростішому вигляду (рис.3.1). Знайти результуючий опір $x_{рез}$ і результуючу еквівалентну ЕРС $E_{рез}$.

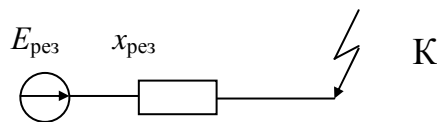


Рис. 3.1 – Згорнута схема заміщення

3) Визначити початкове діюче значення періодичної складової струму в точці КЗ у іменованій системі одиниць (кА) за формулою

$$I''_{\Pi} = \frac{E_{\text{рез}}}{X_{\text{рез}}} \cdot I_{\text{б}}, \quad (1.10)$$

де $I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3}U_{\text{б}}}$ – базисний струм на ступені КЗ в кА.

Приклад 3.1. Для розрахункової схеми, представленої на рис.3.2, знайти діюче значення періодичної складової струму КЗ в точці “К” для початкового моменту часу.

Параметри розрахункової схеми:

– параметри генератора G:

$$S_{\text{ном}} = 235,3 \text{ МВА}; U_{\text{ном}} = 15,75 \text{ кВ}; x''_d = 0,190;$$

– параметри системи C:

$$x_c = 15 \text{ Ом}; U_c = 230 \text{ кВ};$$

– параметри автотрансформатора АТ:

$$S_{\text{ном}} = 125 \text{ МВА}; U_{\text{номВ}} = 230 \text{ кВ}; U_{\text{номС}} = 121 \text{ кВ}; U_{\text{номН}} = 38,5 \text{ кВ};$$

$$u_{\text{кВ-С}} = 11\%; u_{\text{кВ-Н}} = 31\%; u_{\text{кС-Н}} = 19\%;$$

– параметри трансформатора Т1:

$$S_{\text{ном}} = 250 \text{ МВА}; U_{\text{номВ}} = 121 \text{ кВ}; U_{\text{номН}} = 15,75 \text{ кВ}; u_{\text{кВ-Н}} = 10,5\%;$$

– параметри трансформатора Т2:

$$S_{\text{ном}} = 16 \text{ МВА}; U_{\text{номВ}} = 38,5 \text{ кВ.}; U_{\text{номН}} = 6,3 \text{ кВ}; u_{\text{кВ-Н}} = 8\%;$$

– параметри реактора Р:

$$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}; I_{\text{ном}} = 0,3 \text{ кА}; x_p = 4\%;$$

– параметри лінії W1:

$$l_1 = 15 \text{ км}; x_{\text{уд}} = 0,4 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}; n_1 = 2;$$

– параметри лінії W2:

$$l_2 = 10 \text{ км}; x_{\text{уд}} = 0,4 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}; n_2 = 1, \text{ де } n_1, n_2 - \text{кількість ланцюгів ЛЕП.}$$

Задачу вирішуємо у відносних одиницях за формулами наближеного при-

ведення. Приймаємо, що $S_6 = 100 \text{ MVA}$;

$$U_{6_I} = 230 \text{ кВ}; U_{6_{II}} = 115 \text{ кВ}; U_{6_{III}} = 10,5 \text{ кВ}; U_{6_{IV}} = 37 \text{ кВ}; U_{6_V} = 6,3 \text{ кВ},$$

де $U_{6_I} \dots U_{6_V}$ - базисні напруги на відповідних ступенях трансформації.

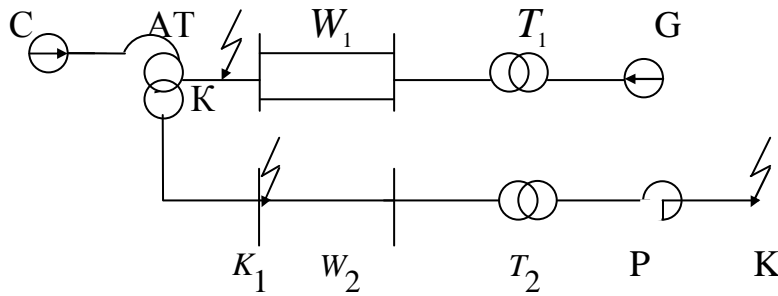


Рис. 3.2 – Розрахункова схема

Схему заміщення наведено на рис. 3.3

$$E_1 = \frac{U_c}{U_{6_I}} = \frac{230}{230} = 1;$$

$$x_1 = x_c \frac{S_6}{U_{6_I}^2} = 15 \frac{100}{230^2} = 0,028;$$

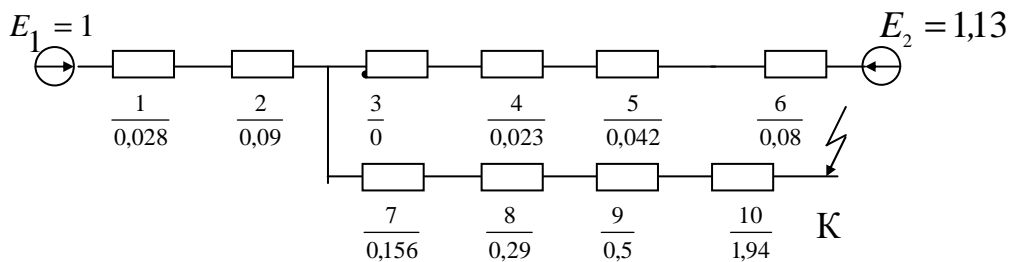


Рис. 3.3 – Схема заміщення

$E_2 = 1,13$ за табл. 3.1

$$X_6 = x_d'' \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = 0,19 \frac{100}{235,3} = 0,08;$$

$$u_{KB} \% = 0,5(u_{KB-C} + u_{KB-H} - u_{KC-H}) \% = 0,5(11 + 31 - 19) = 11,5\%;$$

$$u_{KC} \% = 0,5(u_{KB-C} + u_{KC-H} - u_{KB-H}) \% = 0,5(11 + 19 - 31) = -0,5\%$$

$$u_{кН\%} = 0,5(u_{кВ-Н} + u_{кС-Н} - u_{кВ-С})\% = 0,5(31 + 19 - 11) = 19,5\%;$$

$$x_2 = \frac{u_{кВ}\%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}} = \frac{11,5}{100} \frac{100}{125} = 0,09;$$

$$x_3 = 0;$$

$$x_7 = \frac{u_{кН}\%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}} = \frac{19,5}{100} \frac{100}{125} = 0,156;$$

$$x_4 = \frac{1}{n_1} x_{уд1} \frac{S_{\delta}}{U_{\delta_{II}}^2} = \frac{1}{2} 0,4 \cdot 15 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,023;$$

$$x_5 = \frac{u_{кВ-Н}\%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{250} = 0,042;$$

$$x_8 = \frac{1}{n_2} x_{уд2} \frac{S_{\delta}}{U_{\delta_{IV}}^2} = 0,4 \cdot 10 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,29;$$

$$x_9 = \frac{u_{кВ-Н}\%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}} = \frac{8}{100} \frac{100}{16} = 0,5;$$

$$I_{\delta_V} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta_V}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,17 \text{ кА};$$

$$x_{10} = \frac{x_p\%}{100} \frac{U_{НОМ}}{I_{НОМ}} \frac{I_{\delta_V}}{U_{\delta_V}} = \frac{4}{100} \frac{10}{0,3} \frac{9,17}{6,3} = 1,94.$$

Згортаємо схему заміщення щодо точки короткого замикання (рис. 3.4):

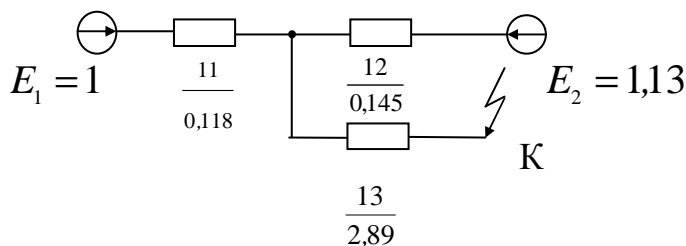


Рис. 3.4 – Спрощена схема заміщення

$$x_{11} = x_1 + x_2 = 0,028 + 0,09 = 0,118;$$

$$x_{12} = x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 0 + 0,023 + 0,042 + 0,08 = 0,145;$$

$$x_{13} = x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} = 0,156 + 0,29 + 0,5 + 1,94 = 2,89.$$

Обчислюємо результуючий опір і результуючу ЕРС (рис. 3.5).

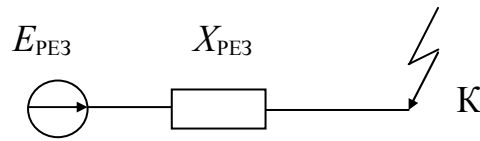


Рис. 3.5 – Остаточно спрощена схема заміщення

$$E_{\text{рез}} = \frac{E_1 \cdot x_{12} + E_2 \cdot x_{11}}{x_{11} + x_{12}} = \frac{1 \cdot 0,145 + 1,13 \cdot 0,118}{0,118 + 0,145} = 1,06;$$

$$X_{\text{рез}} = \frac{x_{11} \cdot x_{12}}{x_{11} + x_{12}} + x_{13} = \frac{0,118 \cdot 0,145}{0,118 + 0,145} + 2,89 = 2,955.$$

Знаходимо початкове значення періодичної складової струму трифазного короткого замикання в точці “К”:

$$I_{\text{п}}'' = \frac{E_{\text{рез}}}{X_{\text{рез}}} I_{\text{бв}} = \frac{1,06}{2,955} \cdot 9,17 = 3,29 \text{ кА}.$$

ЗАНЯТТЯ 4. Розрахунок діючого значення періодичної складової струму для довільного моменту часу за методом розрахункових кривих

У наближених розрахунках періодичну складову струму в точці КЗ для довільного моменту часу визначають методом розрахункових кривих або методом типових кривих. Вибір методу розрахунку і відповідних кривих залежить від поставленого завдання, потужності генератора, системи збудження і постійної часу порушення.

Розрахункові криві використовують для турбогенераторів потужністю до 300 МВт з АРЗ. На рис.4.1 і 4.2 наведені розрахункові криві струмів короткого замикання турбогенераторів середньої потужності до 100 МВт [2] і 200 – 300 МВт [3] відповідно.

Цей метод використовують, коли завдання обмежене перебуванням струму в місці короткого замикання чи залишкової напруги безпосередньо за аварійною гілкою. У даному занятті рекомендується розглянути розрахункову схему,

в якій генератори знаходяться в різних умовах щодо місця КЗ. Розрахунок у цьому випадку необхідно проводити за індивідуальною зміною.

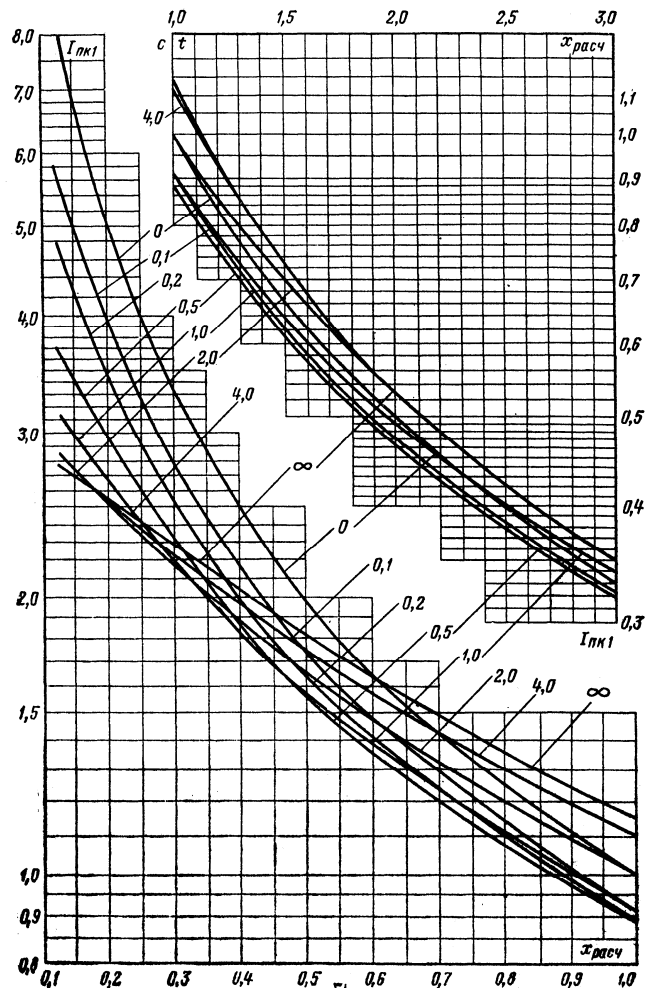


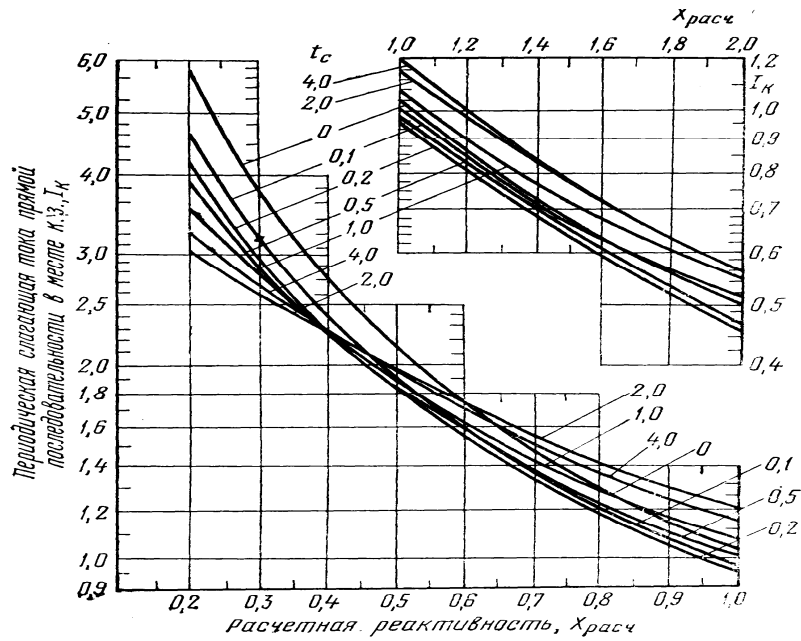
Рис. 4.1 – Розрахункові криві струмів КЗ турбогенератора середньої потужності до 100 МВт з АРЗ, $T_e=0,57\text{с}$

Порядок розрахунку:

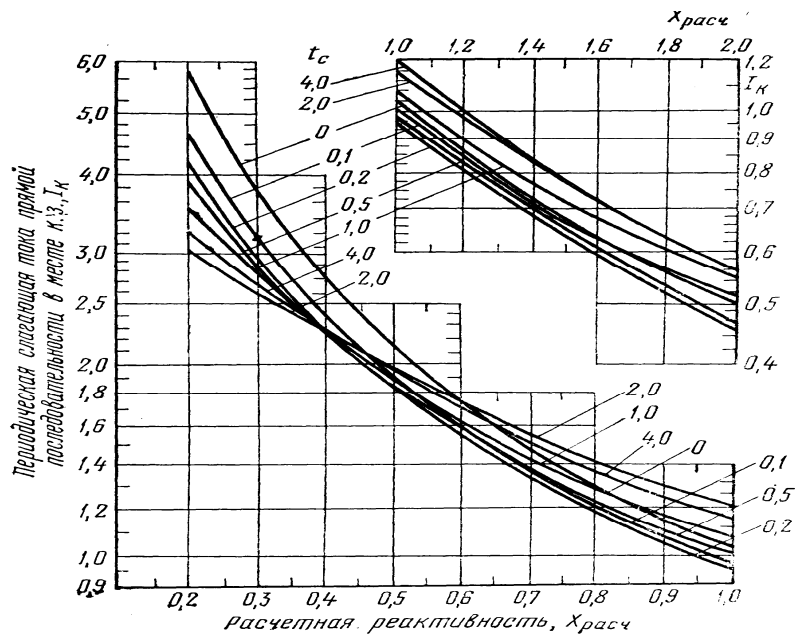
1) Для заданої розрахункової електричної системи скласти схему заміщення, в якій генератори враховуються своїми понадпереходними опорами x_d'' . ЕРС не вказують.

Навантаження в схемі заміщення не враховують за винятком потужного навантаження, підключеного до шин, де відбулося КЗ.

2) Перетворити схему заміщення до багатопроменевої зірки.



а)



б)

Рис. 4.2 – Розрахункові криві струмів КЗ типового турбогенератора 200 – 300 МВт з АРЗ: а) з постійною часу збудника $T_e = 0 \pm 0,15$ с; б) з постійною часу збудника $T_e = 0,2 \pm 0,3$ с.

Розрахунок здійснюють за індивідуальною зміною, тому що вихідна розрахункова схема містить генератори, що знаходяться в різних умовах щодо місця КЗ, чи систему нескінченної потужності. При цьому в системі будь-якої складності досить виділити дві-три групи джерел живлення, об'єднавши в кожену з них генератори, що знаходяться приблизно в однакових умовах щодо місця КЗ.

Перетворення схеми заміщення проводиться таким чином, щоб визначити результуючий опір до точки КЗ від кожного джерела (рис.4.3).

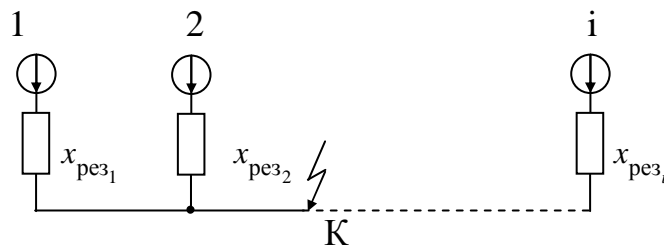


Рис. 4.3 – Схема заміщення з радіально підключеними джерелами

У процесі перетворення схеми заміщення часто виникає завдання розподілу зв'язаних ланцюгів. Цей випадок показаний на рис 4.4.

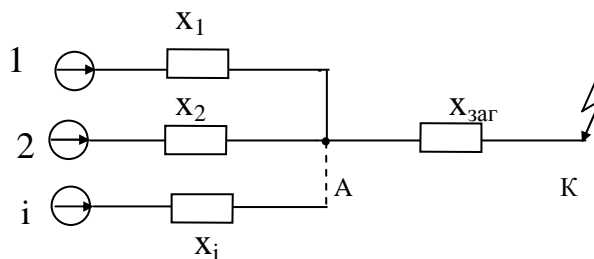


Рис. 4.4 – Схема заміщення з джерелами, підключеними через спільний опір

Струми від джерел 1,2,...,i проходять через загальний опір $x_{заг}$. Щоб перетворити схему до променевого вигляду, наданому на рис 5.18, необхідно скористатися коефіцієнтами струморозподілу C_i .

Результуючі опори променів у цьому випадку визначають за формулою:

$$x_{рез_i} = \frac{x_{рез}}{C_i}, \quad (1.11)$$

де $x_{рез} = x_{екв} + x_{заг}$ – результуючий опір схеми відносно точки КЗ, $C_i = \frac{x_{екв}}{x_i}$ –

коефіцієнт струморозподілу i гілки.

Причому $x_{екв} = x_1 // x_2 ... // x_i$ – еквівалентний опір всіх джерел живлення відносно точки “А”.

3) Привести отримані результуючі значення опорів гілок до номінальних умов, тобто визначити розрахункові опори:

$$x_{розр_i} = x_{рез_i} \frac{S_{ном \sum i}}{S_6}, \quad (1.12)$$

де $S_{ном \sum i}$ – сумарна номінальна потужність i -ї групи джерел живлення в МВА.

4) За відповідними розрахунками кривих (рис.4.1, 4.2.) для заданого моменту часу t і за знайденими $x_{розр_i}$ визначити відносні значення періодичної складової струму КЗ від кожного джерела ($I_{*П_i, t}$).

5) Обчислити значення періодичної складової струму КЗ від кожного джерела в кА:

$$I_{П_i, t} = I_{*П_i, t} \frac{S_{ном \sum i}}{\sqrt{3}U_6}, \quad (1.13)$$

6) Визначити періодичну складову струму в точці КЗ в заданий момент часу в кА:

$$I_{П, t} = \sum_{i=1}^n I_{П_i, t}, \quad (1.14)$$

де n – кількість променів.

Примітка:

При $x_{\text{розр}_i} > 3$ періодична складова струму КЗ вважається незмінною і визначається за формулою

$$I_{\text{п}_i, \text{т}} = \frac{I}{x_{\text{розр}_i}} \frac{S_{\text{НОМ} \Sigma i}}{\sqrt{3} U_6}, \quad (1.15)$$

або

$$I_{\text{п}_i, \text{т}} = \frac{I_6}{x_{\text{рез}_i}} \quad (1.16)$$

Періодична складова струму КЗ в кА від системи нескінченної потужності для будь-якого моменту часу ($I_{\text{п}_c, \text{т}}$) визначається як:

$$I_{\text{п}_c, \text{т}} = \frac{I_6}{x_{\text{рез}_c}}, \quad (1.17)$$

де $x_{\text{рез}_c}$ – результуючий опір від системи до точки КЗ.

Приклад 4.1. Для розрахункової схеми, представленої на рис.3.2, знайти діюче значення періодичної складової струму трифазного короткого замикання в точці “К1” для моменту часу $t = 0,1 \text{ с}$.

Опори елементів схеми заміщення розраховані в прикладі, наведеному вище (Заняття 3). Навантажувальну гілку не враховуємо. Після перетворення одержуємо схему, представлену на рис. 4.5.

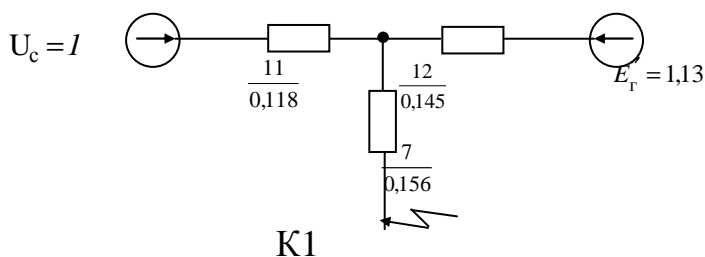


Рис. 4.5 – Схема заміщення без навантажувальної гілки

За допомогою коефіцієнтів струморозподілу перетворимо схему до двопроменевого вигляду (рис.4.6).

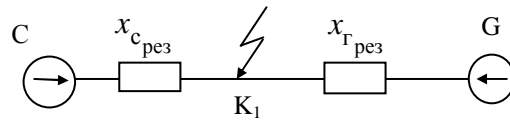


Рис. 4.6 – Спрощена схема заміщення

$$x_{\text{екв}} = \frac{x_{11} \cdot x_{12}}{x_{11} + x_{12}} = \frac{0,118 \cdot 0,145}{0,118 + 0,145} = 0,065;$$

$$C_c = \frac{x_{\text{екв}}}{x_{11}} = \frac{0,065}{0,118} = 0,551; \quad C_r = \frac{x_{\text{екв}}}{x_{12}} = \frac{0,065}{0,145} = 0,449;$$

$$x_{\text{рез}} = x_{\text{екв}} + x_7 = 0,065 + 0,156 = 0,221;$$

$$x_{\text{cрез}} = \frac{x_{\text{рез}}}{C_c} = \frac{0,221}{0,551} = 0,401;$$

$$x_{\text{грез}} = \frac{x_{\text{рез}}}{C_r} = \frac{0,221}{0,449} = 0,493.$$

Так як напруга на шинах системи під час короткого замикання в точці “К1” не змінюється, то діюче значення періодичної складової струму КЗ від системи для будь-якого моменту часу буде постійно і дорівнюватиме

$$I_{\text{пс}} = \frac{E_c}{x_{\text{cрез}}} \cdot I_{\text{бIV}} = \frac{1}{0,401} \cdot 1,56 = 3,89 \text{ кА},$$

$$\text{де } I_{\text{бIV}} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{бIV}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА},$$

$$x_{\text{грозр}} = x_{\text{грез}} \frac{S_{\text{ном}}}{S_6} = 0,493 \frac{235,3}{100} = 1,16.$$

Діюче значення періодичної складової струму КЗ від генератора для моменту часу $t=0,1\text{с}$ знаходимо за розрахунковими кривими рис. 4.1 $I_{*_{\text{пг}}} = 0,88$.

В іменованих одиницях:

$$I_{\text{пг}} = I_{*_{\text{пг}}} \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{бIV}}} = 0,88 \frac{235,3}{\sqrt{3} \cdot 37} = 3,23 \text{ кА}.$$

Струм в точці “К1” через 0,1с після КЗ буде дорівнювати:

$$I_{n,t} = I_{n_c} + I_{n_r} = 3,89 + 3,23 = 7,12 \text{ кА.}$$

ЗАНЯТТЯ 5. Розрахунок діючого значення періодичної складової струму для довільного моменту часу за методом типових кривих

Типові криві використовують для турбогенераторів потужністю до 1200 МВт із системами збудження різного типу. На рис. 5.1-5.4 наведені типові криві для різних груп турбогенераторів з урахуванням сучасної тенденції оснащення генераторів різних типів певними системами збудження [4].

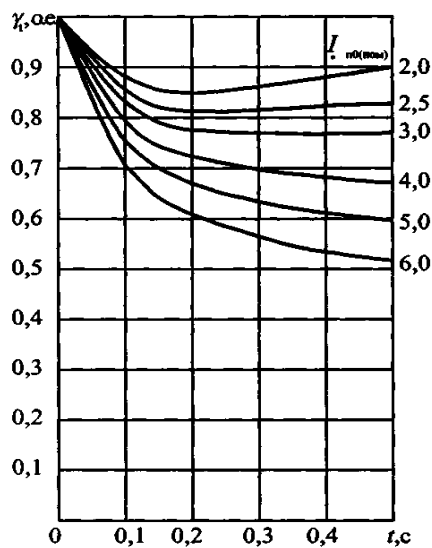


Рис. 5.1 – Типові криві зміни періодичної складової струму КЗ від турбогенераторів з тиристорною незалежною системою збудження

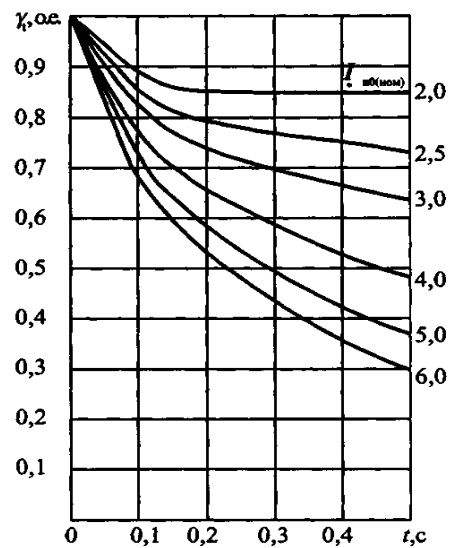


Рис. 5.2 – Типові криві зміни періодичної складової струму КЗ від турбогенераторів з тиристорною системою самозбудження

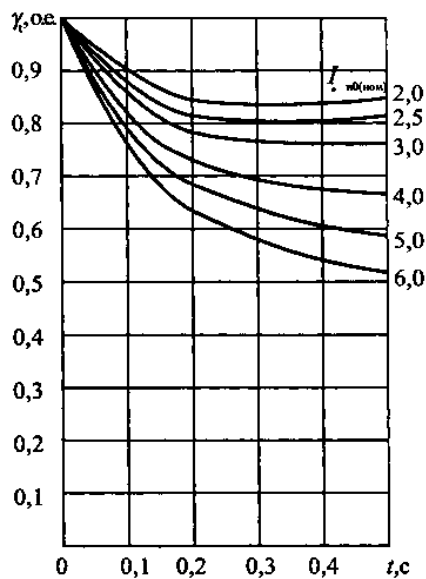


Рис. 5.3 – Типові криві зміни періодичної складової струму КЗ від турбогенераторів з діодною незалежною (високоякісною) системою збудження

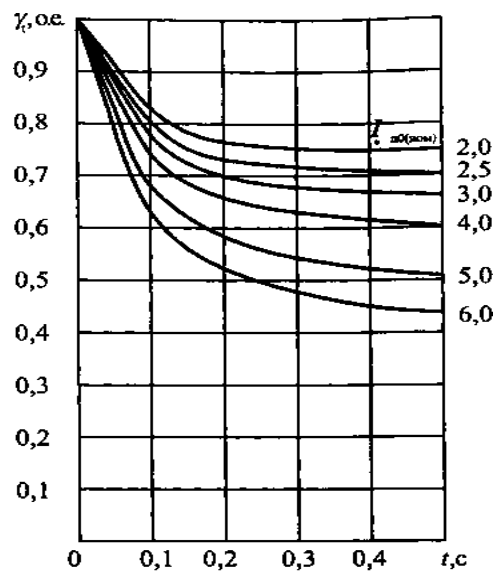


Рис. 5.4 – Типові криві зміни періодичної складової струму КЗ від турбогенераторів типів ТВВ-1000-2УЗ і ТВВ-1200-2УЗ з діодною безщітковою системою порушення

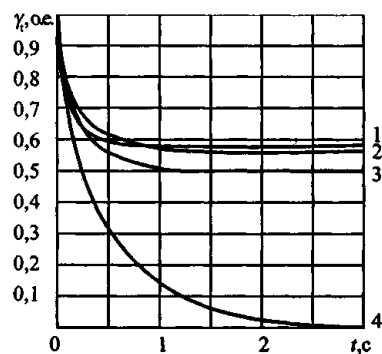


Рис. 5.5 – Типові криві зміни періодичного струму КЗ від турбогенераторів з рівними системами збудження при трифазних КЗ на виводах генераторів

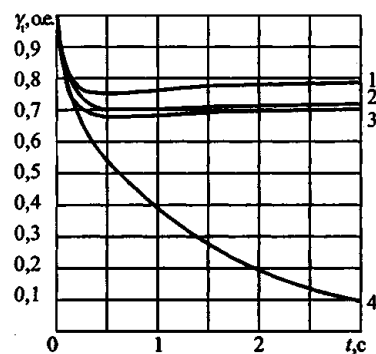


Рис. 5.6 – Типові криві зміни періодичного струму КЗ від турбогенераторів з рівними системами збудження при трифазних КЗ на стороні високої напруги блочних трансформаторів

У тих випадках, коли розрахункова тривалість КЗ перевищує 0,5с для розрахунку періодичної складової струму в довільний момент часу при КЗ на виводах турбогенераторів допустимо використовувати криві, наведені на рис. 5.5, а

при КЗ на стороні високої напруги блочних трансформаторів – криві, наведені на рис. 5.6. Як на рис. 5.5, так і на рис. 5.6 крива 1 належить до турбогенераторів з діодною безрахунковою системою порушення, крива 2 – з тиристорною незалежною системою збудження, крива 3 – з діодною незалежною (високоякісною) системою збудження і крива 4 – з тиристорною системою самозбудження.

Типові криві для синхронного електродвигуна наведені на рис. 5.7, а для асинхронного електродвигуна – на рис. 5.8.

Типові криві враховують зміну діючого значення періодичної складової струму короткого замикання, якщо відношення діючого значення періодичної складової струму генератора в початковий момент КЗ до його номінального струму дорівнює чи більше двох. При менших значеннях цього співвідношення слід вважати, що діюче значення періодичної складової струму КЗ не змінюється в часі, тобто $I_{п, t} = I''_п = \text{const}$.

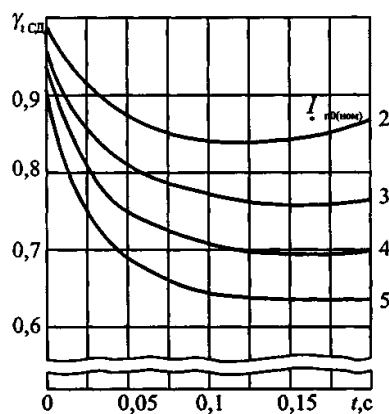


Рис. 5.7 – Типові криві для синхронного електродвигуна

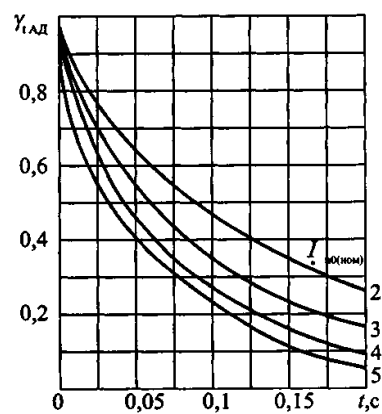


Рис. 5.8 – Типові криві для асинхронного електродвигуна

Метод типових кривих використовують, у випадках, коли завдання обмежене перебуванням струму в місці короткого замикання чи залишкової напруги безпосередньо за аварійною гілкою. В даному занятті рекомендується розглянути розрахункову схему, в якій генератори знаходяться в різних умовах відносно місця КЗ. Розрахунок у цьому випадку необхідно проводити за індивідуа-

льною зміною.

Порядок розрахунку:

Розрахунок діючого значення періодичної складової струму КЗ від синхронного генератора (СГ) чи декількох однотипних СГ, що знаходяться в однакових умовах щодо точки КЗ варто вести в наступному порядку:

1) За вихідною розрахунковою схемою скласти еквівалентну схему заміщення для визначення початкового значення періодичної складової струму КЗ I''_{Π} від генератора або групи генераторів. Синхронні машини слід врахувати понадпереходними опорами і ЕРС вираженими у відносних одиницях при вибраних базисних умовах. Навантаження в схемі заміщення не враховують за винятком тих, які підключені до шин, де відбулося КЗ.

2) Знайти відношення $I_{\text{ном}_{Г*}} = \frac{I''_{\Gamma}}{I_{\text{ном}}}$, що характеризує далекість точки КЗ від генератора (групи генераторів), де $I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{срКЗ}}}$ – номінальний струм СГ (групи генераторів), приведений до такого ступеню напруги, де розглядається КЗ, в кА; $S_{\text{ном}}$ – номінальна потужність СГ або сумарна потужність генераторів, МВА, $U_{\text{срКЗ}}$ – середня напруга того ступеню, де відбулося КЗ.

3) За кривою $\gamma_t = f(t)$ (рис. 5.1-5.8) відповідною знайденому значенню $I_{\text{ном}_{Г*}}$, для заданого моменту часу знайти відношення струмів $\frac{I_{\Gamma}}{I''_{\Gamma}} = \gamma_t$.

4) Визначити діюче значення періодичної складової струму КЗ від генератора (групи генераторів) в момент часу t в кА:

$$I_{\Gamma, t} = \gamma_t \cdot I''_{\Gamma} \cdot I_{\text{б}}. \quad (1.18)$$

Якщо джерела електричної енергії різнотипні чи з різною віддаленістю щодо точки КЗ, то дійсну схему заміщення потрібно привести до радіального (якщо це можливо). Кожен промінь у такій схемі відповідає виділеному джере-

лу чи групі однотипних джерел і пов'язаний із точкою КЗ. Досить виділити три промені. Джерела, безпосередньо пов'язані з точкою КЗ, а також джерела нескінченної потужності варто розглядати окремо від інших джерел.

Розрахунок діючого значення періодичної складової струму КЗ кожного променя здійснюється в порядку викладеному вище. Діюче значення періодичної складової струму в точці КЗ у заданий момент часу t визначається як сума відповідних струмів усіх променів.

На рис. 5.9 наведено типові криві для розрахунку періодичної складової струму в точці КЗ для довільного моменту часу при зв'язку генератора й електричної системи з точкою КЗ через загальний опір [5].

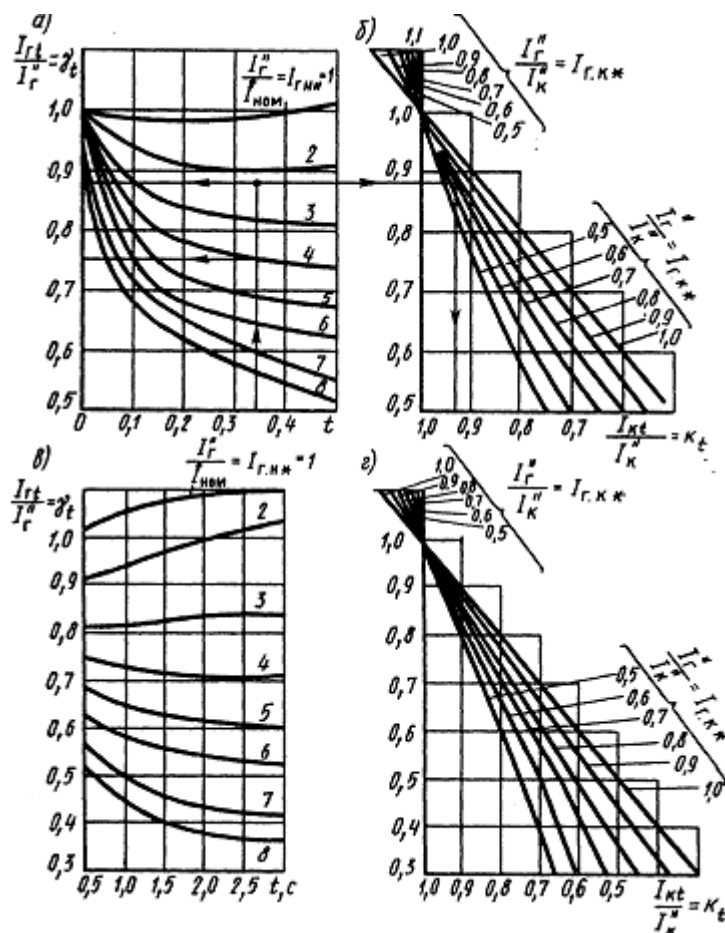


Рис. 5.9 – Типові криві для визначення періодичної складової струму КЗ синхронних машин з тиристорною або високочастотною системою збудження й синхронних компенсаторів

Якщо група генераторів і система пов'язані з точкою КЗ через загальний

опір $x_{\text{заг}}$ (рис. 5.10), то розрахунок періодичної складовий необхідно вести в наступному порядку:

1. Знайти результуючий опір $x_{\text{рез}}$ і результуючу ЕРС $E''_{\text{рез}}$, та визначити початкове значення періодичної складової струму в точці КЗ

$$I''_{\text{к}} = \frac{E''_{\text{рез}}}{x_{\text{рез}}} \cdot I_{\text{б}}.$$

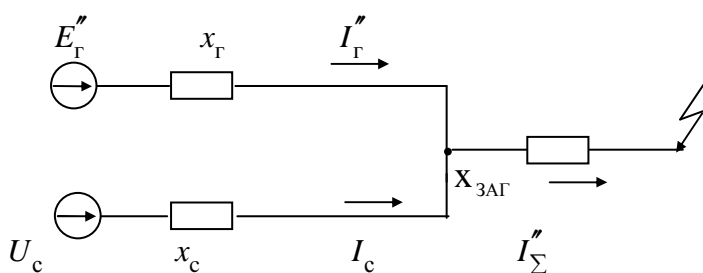


Рис. 5.10 – Схема заміщення мережі з джерелами, пов'язаними з точкою КЗ через загальний опір

2. Обчислити початкове значення періодичної складової струму в гілці генератора

$$I''_{\text{Г}} = (E''_{\text{Г}} I_{\text{б}} - I''_{\text{к}} x_{\text{заг}}) / x_{\text{Г}}.$$

3. Визначити співвідношення $\frac{I''_{\text{Г}}}{I_{\text{ном}}}$ і $\frac{I''_{\text{Г}}}{I''_{\text{к}}}$.

Якщо $\frac{I''_{\text{Г}}}{I''_{\text{к}}} < 0,5$, що відповідає великій електричній віддаленості генератора

від точки КЗ або малій його потужності, то генератор доцільно об'єднати з системою.

4. За кривою $\gamma_t = f(t)$ (рис. 5.9), відповідною знайденому значенню

$\frac{I''_{\Gamma}}{I_{\text{ном}_\Gamma}}$ для розрахункового моменту часу t , знайти співвідношення струмів

$\frac{I_{n,t}}{I''_{\Gamma}} = \gamma_t$ і за ним і кривою, що відповідає значенню $\frac{I''_{\Gamma}}{I''_{\Sigma}}$, визначити співвідно-

шення $\frac{I_{n,t_{\Sigma}}}{I''_{\Sigma}} = K_t$.

5. Обчислити діюче значення періодичної складової від системи і групи генераторів у момент часу t в Ка

$$I_{n,t_{\Sigma}} = K_t \cdot I''_{\Sigma}.$$

6. Знайти діюче значення періодичної складової струму в точці КЗ в заданий момент часу t , як суму струму $I_{n,t_{\Sigma}}$ і відповідних струмів незалежних генеруючих гілок.

Приклад 5.1. Для розрахункової схеми, наведеній на рис 3.2, визначити діюче значення періодичної складової струму КЗ в точці “К1” для моменту часу $t=0,1\text{с}$.

Опори елементів схеми заміщення розраховані в прикладі 3.1. Після перетворення одержуємо схему, представлену на рис. 5.11.

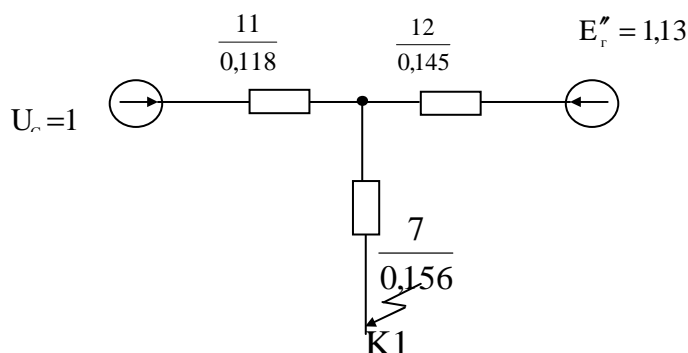


Рис. 5.11 – Схема заміщення електричної мережі

Визначаємо початкове значення періодичної складової струму КЗ в точці “К1”

$$x_{\text{рез}} = \frac{x_{11} \cdot x_{12}}{x_{11} + x_{12}} + x_7 = \frac{0,118 \cdot 0,145}{0,118 + 0,145} + 0,156 = 0,221;$$

$$E''_{\text{рез}} = \frac{E''_r \cdot x_{11} + U_c \cdot x_{12}}{x_{11} + x_{12}} = \frac{1,13 \cdot 0,118 + 1,0 \cdot 0,145}{0,118 + 0,145} = 1,06;$$

$$I''_k = \frac{E''_{\text{рез}}}{x_{\text{рез}}} \cdot I_{6IV} = \frac{1,06}{0,221} \cdot 1,56 = 7,47 \text{ кА}.$$

Обчислюємо початкове значення періодичної складової струму в гілці генератора

$$I''_r = \frac{E''_r \cdot I_6 - x_7 \cdot I''_k}{x_{12}} = \frac{1,13 \cdot 1,56 - 0,156 \cdot 7,47}{0,145} = 4,12 \text{ кА}.$$

Визначаємо співвідношення

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{срКЗ}}} = \frac{235,3}{\sqrt{3} \cdot 37} = 3,74 \text{ кА};$$

$$\frac{I''_r}{I''_k} = \frac{4,12}{7,47} = 0,55; \quad \frac{I''_r}{I_{\text{ном}}} = \frac{4,12}{3,74} = 1,11.$$

4. За типовими кривими (рис 5.17) для $t=0,1\text{с}$ знаходимо:

$$\gamma_t = \frac{I_{r,t}}{I''_r} = 0,98; \quad K_t = \frac{I_{k,t}}{I''_k} = 0,98.$$

5. Обчислюємо діюче значення періодичної складової струму КЗ у точці "К1" для моменту часу $t=0,1\text{с}$.

$$I_{k,t} = K_t \cdot I''_k = 0,98 \cdot 7,47 = 7,32 \text{ кА}.$$

ЗАНЯТТЯ 6. Розрахунок діючого значення періодичної складової струму КЗ для сталого режиму (I_{∞})

При сталому КЗ генератор, що має регулятор порушення, залежно від його віддаленості від точки КЗ може працювати в режимі граничного порушення чи в режимі нормальної напруги.

У табл. 6.1 наведено співвідношення, якими характеризуються режими ро-

боти генератора з АРЗ.

Таблиця 6.1. – Співвідношення для параметрів роботи генератора з АРЗ

Режим граничного збудження	Режим номінальної напруги
$x_{\text{вн}} \leq x_{\text{кр}}$	$x_{\text{вн}} \geq x_{\text{кр}}$
$I_f = I_{f_{\text{пр}}}$	$I_f \leq I_{f_{\text{пр}}}$
$U \leq U_{\text{ном}}$	$U = U_{\text{ном}}$
$I_{\text{к}} = \frac{E_{q_{\text{пр}}}}{x_d + x_{\text{вн}}} \geq I_{\text{кр}}$	$I_{\text{к}} = \frac{U_{\text{ном}}}{x_{\text{вн}}} \leq I_{\text{кр}}$

Примітка. $x_{\text{кр}}, I_{\text{кр}}$ – критичний опір і критичний струм; $I_f, I_{f_{\text{пр}}}$ – струм збудження і граничний струм збудження; $E_{q_{\text{пр}}}$ – гранична ЕРС, $I_{\text{к}}$ – струм КЗ; $x_{\text{вн}}$ – опір зовнішнього ланцюга КЗ.

Порядок розрахунку:

1. Проаналізувавши участь кожного СГ у підживленні точки КЗ, задати режими їх роботи.

2. Скласти схему заміщення, в якій генератори враховуються параметрами у відповідності з заданими режимами роботи:

для режиму граничного збудження: $E_{\text{г}} = E_{q_{\text{пр}}}, x_{\text{г}} = x_d$,

для режиму нормального збудження: $U_{\text{ном}}, x_{\text{г}} = 0$

Відносне значення граничної ЕРС $E_{q_{\text{пр}}}$ приймається рівною граничному струму порушення $I_{f_{\text{пр}}}$.

Узагальнене навантаження задається опором $x_{\text{навант}} = 1,2$ і ЕРС $E_{\text{навант}} = 0$.

Опори генераторів і навантаження приводяться до базисних умов і основного ступеня за формулами (1.1 и 1.6).

3. Згорнути схему заміщення до найпростішого вигляду і визначити $E_{\text{рез}}, x_{\text{рез}}$.

4. Обчислити сталі значення періодичної складової струму КЗ у відносних

ОДИНИЦЯХ $I_{*\infty} = \frac{E_{\text{рез}}}{x_{\text{рез}}}.$

5. Розгортаючи схему заміщення, визначити струми в генераторних гілках схеми.

6. Обчислити критичні струми від кожного генератора:

$$I_{\text{кр}} = \frac{U_{\text{ном}}}{x_{\text{кр}}}, \text{ де } x_{\text{кр}} = \overset{\circ}{x}_{\Gamma} \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{нр}} - U_{\text{ном}}}.$$

7. Порівнюючи критичні струми з обчисленими струмами в генераторних гілках, перевірити обрані режими роботи генераторів. Якщо режим роботи деяких генераторів обрано неправильно, то перезадати режим їхньої роботи і розрахунок необхідно повторити.

8. Якщо режими роботи всіх генераторів обрані правильно, то визначити сталий струм КЗ у кА:

$$I_{\infty} = I_{*\infty} \cdot I_{\text{б}}$$

Приклад 6.1. Для розрахункової схеми, приведеної на рис. 3.2 визначити діюче значення періодичної складової сталого струму трифазного КЗ в точці “К1”, $I_{f\text{нр}} = 4.$

Вирішення: З огляду на те, що генератор знаходиться за двома ступіннями трансформації від точки КЗ приймемо номінальний режим його роботи. Відповідно до обраного режиму роботи, генератор у схему заміщення вводять $x_{\Gamma} = 0;$ $U_{\Gamma} = U_{\text{ном}} = 1$ Значення опорів інших елементів схеми заміщення взяті з прикладу 1. Схему заміщення з розрахунковими параметрами наведено на рис. 6.1.

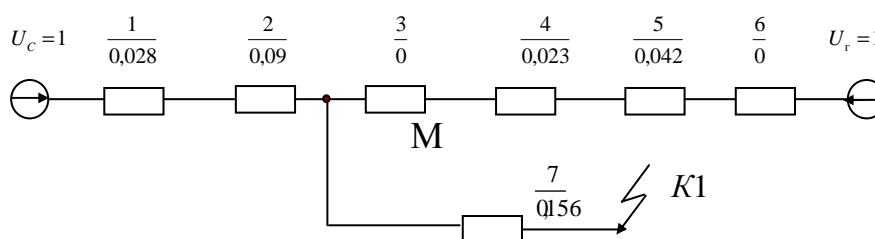


Рис. 6.1. – Схема заміщення електричної мережі

Після перетворення схеми заміщення отримуємо схему, показану на рис. 6.2.

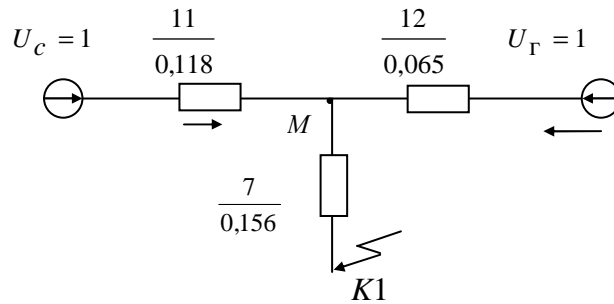


Рис. 6.2. – Схема заміщення після перетворення

$$x_{11} = x_1 + x_2 = 0,028 + 0,09 = 0,118;$$

$$x_{12} = x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 0 + 0,023 + 0,042 + 0 = 0,065.$$

Перетворимо схему до найпростішого вигляду (рис. 6.3.)

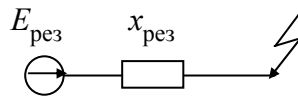


Рис. 6.3. – Згорнута схема заміщення

$$E_{рез} = 1; \quad x_{рез} = \frac{x_{11} \cdot x_{12}}{x_{11} + x_{12}} + x_7 = \frac{0,118 \cdot 0,065}{0,118 + 0,065} + 0,156 = 0,198;$$

$$I_{*\infty} = \frac{E_{рез}}{x_{рез}} = \frac{1}{0,198} = 5,05.$$

За схемою заміщення рис. 6.2 знаходимо струм КЗ у ланцюзі генератора:

$$U_M = I_{*\infty} \cdot x_7 = 5,05 \cdot 0,156 = 0,788;$$

$$I_K = \frac{U_r - U_M}{x_{12}} = \frac{1 - 0,788}{0,065} = 3,26.$$

Визначаємо критичний струм генератора:

$$E_{qnp} = I_{fnp} = 4; \quad x_{кр} = x_{*Г} \frac{U_{ном}}{E_{qnp} - U_{ном}} = 0,08 \frac{1}{4-1} = 0,027;$$

$$I_{кр} = \frac{U_{ном}}{x_{кр}} = \frac{1}{0,027} = 3,7$$

Так як $I_k < I_{кр}$, то генератор працює в режимі номінальної напруги, що відповідає обраному режиму.

Сталий струм КЗ в точці “К1” дорівнює

$$I_{\infty} = I_{*_{\infty}} \cdot I_g = 5,05 \cdot 1,56 = 7,88 \text{ кА.}$$

ЗАНЯТТЯ 6. Розрахунок миттєвого значення аперіодичної складової струму в точці КЗ для заданого моменту часу

Найбільше початкове значення аперіодичної складової струму КЗ у загальному випадку варто приймати рівним амплітуді періодичної складової струму в початковий момент КЗ.

Це справедливо при наступних умовах:

- 1) активна складова результуючого еквівалентного опору розрахункової схеми щодо розрахункової точки КЗ значно менше індуктивної складової, унаслідок чого активною складовою можна зневажити;
- 2) до моменту КЗ гілка розрахункової схеми, в якій знаходиться розрахункова точка КЗ, не навантажена;
- 3) напруга мережі до моменту виникнення КЗ проходить через нуль.

Якщо всі джерела електричної енергії знаходяться приблизно в однакових умовах щодо точки короткого замикання, то величину миттєвого значення аперіодичної складової струму КЗ можна визначити за формулою

$$i_a = \sqrt{2} I''_n \cdot e^{-\frac{t}{T_a}},$$

де I''_n – початковий надперехідний струм; $T_a = \frac{x_{рез}}{\omega r_{рез}}$ – еквівалентна постійна ча-

су загасання аперіодичної складової струму КЗ; $x_{рез}$ – результуючий індуктивний опір схеми щодо точки КЗ при відсутності активних опорів; $r_{рез}$ – результуючий активний опір схеми щодо точки КЗ при відсутності реактивних опорів, ω – кругова частота, що дорівнює 314 1/с.

Якщо генератори знаходяться в різних умовах щодо місця КЗ, то необхідно перетворити схему заміщення до багатопроменевого вигляду.

При цьому в системі будь-якої складності досить виділити дві-три групи джерел живлення, об'єднавши в кожен з них генератори, що знаходяться приблизно в однакових умовах щодо місця КЗ.

Порядок розрахунку:

1. Скласти схему заміщення, щоб у ній всі елементи вихідної розрахункової схеми враховувалися індуктивними опорами. При цьому генератори повинні бути враховані надперехідними параметрами.

2. Перетворити схему заміщення до трипроменевого вигляду (рис. 7.1):

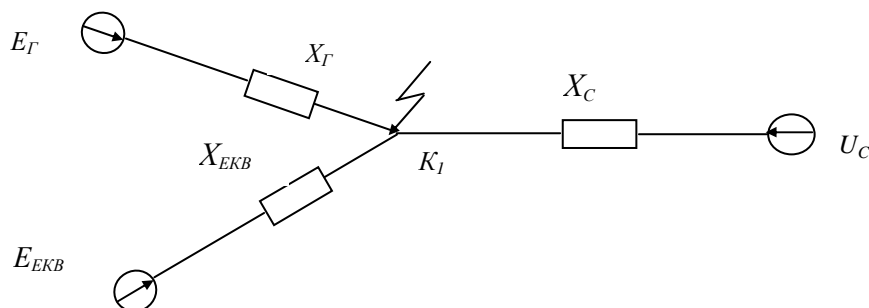


Рис. 7.1 – Схема заміщення електричної мережі трипроменевого вигляду

3. Знайти початкові значення періодичних складових струмів КЗ у кожному промені:

$$I''_{ЕКВ} = \frac{E_{ЕКВ}}{x_{ЕКВ}}, \quad I''_{Г} = \frac{E_{Г}}{x_{Г}}, \quad I''_{С} = \frac{U_{С}}{x_{С}}$$

4. Скласти схему заміщення, в яку всі елементи вводяться своїми активними опорами. Величини цих опорів знаходять за відомим індуктивним опором елемента і відношенню $\frac{x}{r}$, взятому з табл. 7.1.

Таблиця 7.1. – Співвідношення $\frac{x}{r}$ для елементів електричних мереж

Найменування елемента	Співвідношення $\frac{x}{r}$
Турбогенератори до 100 МВт	15-85
Турбогенератори 100-500 МВт	100-140
Трансформатори 5-30 МВА	7-17
Трансформатори 60-500 МВА	20-50
Реактори до 1000 А	15-70
Реактори от 1500 А	40-80
ЛЕП	2-8
Узагальнене навантаження	2,5

5. Згорнути схему заміщення до трипроменевого вигляду й визначити активні опори променів r_{Γ} , $r_{\text{ЕКВ}}$, r_c .

6. Визначити постійні часу загасання $T_{\text{аекв}}$, $T_{\text{аc}}$, $T_{\text{аГ}}$ аперіодичних складових струмів КЗ за формулою

$$T_{\text{аекв}} = \frac{X_{\text{екв}}}{r_{\text{екв}} \cdot \omega}; \quad T_{\text{аc}} = \frac{X_c}{r_c \cdot \omega}; \quad T_{\text{аГ}} = \frac{X_{\Gamma}}{r_{\Gamma} \cdot \omega}.$$

7. Розрахувати миттєве значення аперіодичної складової струму в точці КЗ для заданого моменту часу

$$i_{\text{ат}} = \sqrt{2} \left(I''_{\text{екв}} e^{-\frac{t}{T_{\text{аекв}}}} I''_c e^{-\frac{t}{T_{\text{аc}}}} + I''_{\Gamma} e^{-\frac{t}{T_{\text{аГ}}}} \right)$$

ЗАНЯТТЯ 7. Визначення миттєвого і діючого значень ударного струму КЗ

Якщо всі джерела електричної енергії знаходяться приблизно в однакових умовах щодо точки короткого замикання, то величину миттєвого і діючого значень ударного струму КЗ можна визначити за формулами

$$i_y = \sqrt{2} I''_{\Pi} \cdot k_y, \quad I_y = I''_{\Pi} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2},$$

де $k_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}}$ – ударний коефіцієнт.

Якщо точка КЗ знаходиться на шинах генератора чи на високій стороні блокового трансформатора, чи на шинах навантаження, то миттєве значення ударного струму в місці КЗ варто визначати як суму миттєвих ударних струмів від джерела, на шинах якого відбулося КЗ і від еквівалентного джерела, що замінює всю іншу частину системи.

Порядок розрахунку:

1. Скласти схему заміщення, щоб у ній всі елементи вихідної розрахункової схеми враховувалися індуктивними опорами. При цьому генератори повинні бути враховані надпереходними параметрами.

2. Перетворити схему заміщення до трипроменевого вигляду (рис. 7.1)

3. Визначити ударні коефіцієнти у всіх променях:

$$k_{\text{екв}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a\text{екв}}}}, \quad k_{yc} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{ac}}}, \quad k_{y\Gamma} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a\Gamma}}}$$

4. Знайти миттєве значення ударного струму в місці КЗ, як суму відповідних струмів променів:

$$i_y = \sqrt{2}I''_{\text{екв}} \cdot k_{y \text{ екв}} + \sqrt{2}I''_{\text{с}} \cdot k_{y \text{ с}} + \sqrt{2}I''_{\text{Г}} \cdot k_{y \text{ Г}}.$$

5. Визначити діюче значення ударного струму КЗ:

$$I_y = \sqrt{\left(I''_{\pi_1} + \dots + I''_{\pi_i}\right)^2 + \left(I_{a_1} + \dots + I_{a_i}\right)^2},$$

де $I_{a_i} = \sqrt{2}I''_{\pi_i} \cdot (k_{y_i} - 1)$, k_y – ударний коефіцієнт i -ї гілки, I''_{π_i}, I_{a_i} – діючі значення відповідно періодичної і аперіодичної складових струму КЗ i -ої гілки.

Приклад 8.1. Для розрахункової схеми, приведеної на рис. 3.2, розрахувати миттєве і діюче значення ударного струму трифазного КЗ в точці “К1”.

Так як система і генератор знаходяться приблизно в однакових умовах щодо точки КЗ, то ударний струм розраховуємо за початковим діючим значенням періодичної складової струму КЗ (I''_{π}) знайденим в прикладі 3.1.

1.Складаємо схему заміщення (рис. 8.1), в яку всі елементи вводимо своїми активними опорами відповідно до таблиці 7.1.

2. Згортаємо схему заміщення (рис. 8.1) і розраховуємо результуючий активний опір $r_{\text{рез}}$.

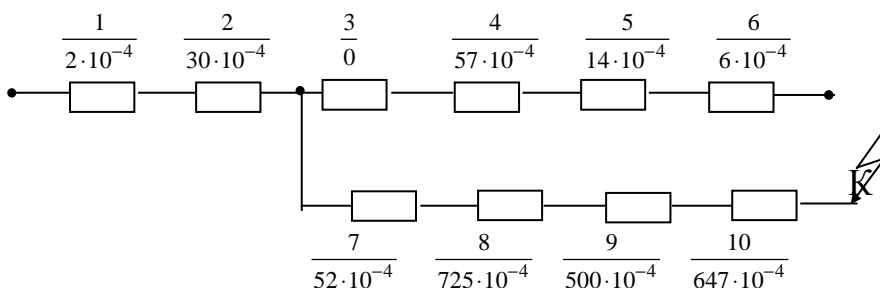


Рис. 7.1 – Схема заміщення активними опорами

$$r_1 = \frac{x_1}{140} = \frac{0,028}{140} = 2 \cdot 10^{-4};$$

$$r_2 = \frac{x_2}{30} = \frac{0,09}{30} = 30 \cdot 10^{-4};$$

$$r_3 = 0;$$

$$r_4 = \frac{x_4}{4} = \frac{0,023}{4} = 57 \cdot 10^{-4};$$

$$r_5 = \frac{x_5}{30} = \frac{0,042}{30} = 14 \cdot 10^{-4};$$

$$r_6 = \frac{x_6}{120} = \frac{0,08}{120} = 6 \cdot 10^{-4};$$

$$r_6 = \frac{x_6}{120} = \frac{0,08}{120} = 6 \cdot 10^{-4};$$

$$r_8 = \frac{x_8}{4} = \frac{0,29}{4} = 725 \cdot 10^{-4};$$

$$r_9 = \frac{x_9}{10} = \frac{0,5}{10} = 500 \cdot 10^{-4};$$

$$r_{10} = \frac{x_{10}}{30} = \frac{1,94}{30} = 647 \cdot 10^{-4};$$

$$r_{11} = r_1 + r_2 = 2 \cdot 10^{-4} + 30 \cdot 10^{-4} = 32 \cdot 10^{-4};$$

$$r_{12} = r_3 + r_4 + r_5 + r_6 = (0 + 57 + 14 + 6) \cdot 10^{-4} = 77 \cdot 10^{-4};$$

$$r_{13} = r_7 + r_8 + r_9 + r_{10} = (52 + 725 + 500 + 647) \cdot 10^{-4} = 1924 \cdot 10^{-4};$$

$$r_{\text{pez}} = \frac{r_{11} \cdot r_{12}}{r_{11} + r_{12}} + r_{13} = \frac{32 \cdot 10^{-4} \cdot 77 \cdot 10^{-4}}{32 \cdot 10^{-4} + 77 \cdot 10^{-4}} + 1924 \cdot 10^{-4} = 1947 \cdot 10^{-4}.$$

3. Розраховуємо постійну часу загасання аперіодичної складової струму короткого замикання й ударний коефіцієнт.

$$T_a = \frac{x_{\text{pez}}}{\omega \cdot r_{\text{pez}}} = \frac{2,955}{314 \cdot 1947 \cdot 10^{-4}} = 0,048 \text{ с};$$

$$\kappa_y = 1 + e^{\frac{0,01}{T_a}} = 1 + e^{\frac{0,01}{0,048}} = 1,812.$$

4. Розраховуємо миттєве i_y і діюче I_y значення ударного струму:

$$i_y = \sqrt{2} I_n'' \kappa_y = \sqrt{2} \cdot 3,29 \cdot 1,812 = 8,4 \text{ кА};$$

$$I_y = I_n'' \sqrt{1 + 2(\kappa_y - 1)^2} = 3,29 \sqrt{1 + 2(1,812 - 1)^2} = 5,01 \text{ кА}.$$

ЗАНЯТТЯ 9. Визначення діючого значення періодичної складової струму в місці несиметричного КЗ для моменту часу t , методом спрямлених характеристик

При розрахунку несиметричного КЗ застосовують метод симетричних складових. Виходячи з правила еквівалентності прямої послідовності, при розрахунку несиметричного КЗ, можна застосовувати всі методи розрахунку трифазного КЗ.

Якщо необхідно визначити струми і напруги для довільних моментів часу не тільки в місці КЗ, а й знайти розподіл струмів по гілках і напруг у вузлах, то застосовують метод спрямлених характеристик.

При розрахунку за цим методом генератор, що має регулятор збудження, залежно від його віддалення від точки КЗ і часу від моменту виникнення КЗ, може працювати в двох режимах:

- режим підйому збудження,
- режим нормальної напруги.

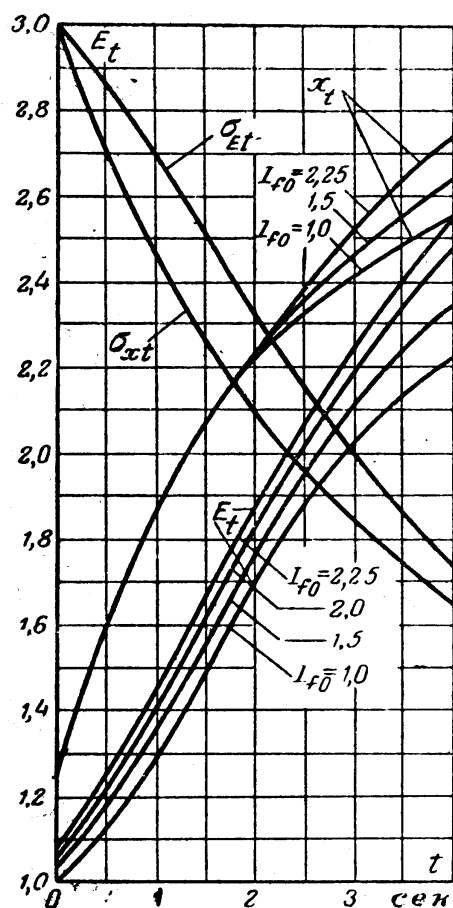
Якщо $t \leq 0,5\text{с}$, то можна вважати, що всі генератори працюють у режимі підйому збудження. В схемі заміщення прямої послідовності генератори задаються ЕРС E_t і опором x_t . Ці параметри визначають за спрямленими характеристиками (рис. 9.1) залежно від заданого моменту часу t і величини заданого попереднього струму збудження I_{f0} . Значення дані у відносних одиницях відносно номінальної потужності генераторів, тому їх необхідно привести до базисних умов.

Якщо $t > 0,5\text{с}$ і генератори розташовані далеко від місця КЗ, то можна вважати, що вони працюють у режимі нормальної напруги і вводяться в схему заміщення $U_{\text{ном}}=1$ і $x_{\text{Г}}=0$.

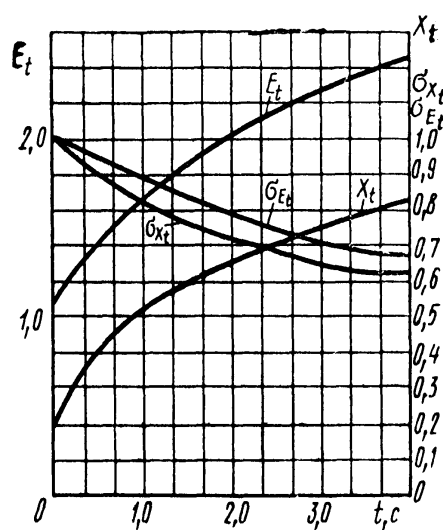
Порядок розрахунку:

1. Проаналізувавши участь кожного генератора в підживленні точки КЗ, задатися режимом його роботи.

2. Скласти схему заміщення прямої послідовності, що по конфігурації й опорам елементів за винятком генераторів цілком відповідає схемі при трифазному КЗ.



а)



б)

Рис. 9.1 – Криві для визначення E_t і X_t (спрямлені характеристики):

а) для турбогенераторів до 100 МВт з АРЗ, $T_e = 0,57$ с; б) для турбогенераторів 200 – 300 МВт з АРЗ, $T_e = 0 \div 0,3$ с.

Генератори враховуються параметрами відповідно до заданого режимами їхньої роботи. Навантаження в схемі заміщення враховуються опором $x_{\text{наб}} = 1,2$ і $E_{\text{РС}} = 0$.

3. Згорнути схему заміщення прямої послідовності до найпростішого вигляду і визначити еквівалентну ЕРС $E_{\text{іекв}}$, і результуючий опір прямої послідовності $x_{\text{ірез}}$.

4. Скласти схеми заміщення зворотної і нульової послідовностей, перетворити їх і знайти результуючі опір $x_{2 \text{ рез}}$ і $x_{0 \text{ рез}}$.

Значення опорів деяких елементів, виражені через опори прямої послідовності наведені в табл. 9.1.

Таблиця 9.1. – Значення опору нульової послідовності для елементів електричних мереж

Елементи схеми	Опір x_0
<u>Лінія одноланцюгова:</u>	
без тросів	$3,5 x_1$
із сталевими тросами	$3,0 x_1$
з добре провідними тросами	$2,0 x_1$
<u>Лінія ланцюгова</u>	
без тросів (із сталевими тросами)	$5,5 x_1 (4,7 x_1)$
з добре провідними тросами	$3,0 x_1$
Трижильні кабелі	$(3,5 - 4,6) x_1$
Реактори	x_1
Генератори	$(0,15-0,6) x_d''$
<u>Трансформатори:</u>	
двохобмотковий із з'єднанням обмоток Y°/Δ	x_1
тристержневий з з'єднанням обмоток Y°/Y	$0,5 x_1 + x_{\mu 0}$
тристержневий із з'єднанням обмоток Y°/Y_\circ	$0,25 x_1 + x_{\mu 0}$
Чотири – або п'ятистержневий із з'єднанням обмоток Y°/Y_\circ	x_1

При складанні схеми необхідно керуватися наступним: у схему заміщення

не вводиться трансформатор і наступні за ним елементи, якщо обмотка трансформатора з боку точки короткого замикання з'єднана в трикутник чи у зірку з незаземленою нейтраллю. Схема заміщення закінчується трансформатором, якщо його обмотка з'єднана за схемою $Y \circ / \Delta$, причому обмотка, з'єднана в зірку з заземленою нейтраллю, звернена вбік точки КЗ.

5. Розрахувати струм прямої послідовності особливої фази $I_{к, A1}^{(n)}$

$$I_{к, A1}^{(n)} = \frac{E_{1\text{рез}}}{x_{1\text{рез}} + \Delta x^{(n)}},$$

де $\Delta x^{(n)}$ – додатковий індуктивний опір. Значення $\Delta x^{(n)}$ для різних видів КЗ приведені в табл. 9.2.

Таблиця 9.2. – Значення додаткового опору та коефіцієнти для несиметричних КЗ

Вид КЗ	Додатковий опір $\Delta x^{(n)}$	Значення коефіцієнта $m^{(n)}$
Двохфазне	$x_{2\text{рез}}$	$\sqrt{3}$
Однофазне	$x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}$	3
Двохфазне на землю	$\frac{x_{2\text{рез}} \cdot x_{0\text{рез}}}{x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\text{рез}} \cdot x_{0\text{рез}}}{(x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})^2}}$

6. Знайти критичний опір і критичний струм кожного генератора для заданого моменту часу:

$$x_{кp,t}^{\circ} = x_t^{\circ} \frac{U_{\text{ном}}}{E_t - U_{\text{ном}}},$$

$$I_{кp,t} = \frac{U_{\text{ном}}}{x_{кp,t}^{\circ}},$$

$$\text{де } x_t^{\circ} = x_t \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{ном}}}$$

7. Розгорнувши схему заміщення прямої послідовності знайти розподіл струму прямої послідовності по гілках схеми і визначити струм від кожного генератора. Перевірити правильність вибору режиму, порівнюючи обчислений для даного генератора струм прямої послідовності з його критичним струмом.

У режимі підйому збудження $I_1 > I_{кр, t}$, в режимі нормальної напруги $I_1 \leq I_{кр, t}$. Якщо режим роботи хоча б одного генератора обраний неправильно, то необхідно перезадати режим його роботи і розрахунок повторити.

8. Якщо режими роботи всіх генераторів обрані правильно, розрахувати фазну величину періодичної складової струму пошкодженої фази в місці несиметричного КЗ.

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{к, A1}^{(n)} \cdot I_0,$$

де $m^{(n)}$ – коефіцієнт, показує в скількох разів струм пошкодженої фази в місці КЗ більше струму прямої послідовності.

Значення коефіцієнтів $m^{(n)}$ для різних видів КЗ приведені в табл. 9.2.

9. Знаючи струм прямої послідовності, розрахувати напруги всіх послідовностей і струми зворотної і нульової послідовностей. Розрахункові вирази для визначення симетричних складових струмів і напруг приведені в табл. 9.3 – 9.5.

10. Задавши масштаб побудувати векторні діаграми струмів і напруг в точці КЗ.

11. Використовуючи табл. 9.3 – 9.5 розрахувати комплексні значення фазних струмів і напруг при заданому несиметричному КЗ. Порівняти розраховані величини зі значеннями на векторних діаграмах.

Таблиця 9.3. – Розрахункові вирази для визначення симетричних складових
для двохфазного КЗ

Розрахункові величини та їх позначення	Вид короткого зами- кання	
	Двохфазне	
Струм зворотної послідовності	\dot{I}_{A2}	$-\dot{I}_{A1}$
Струм нульової послідовності	\dot{I}_{A0}	0
Струм фази А	\dot{I}_A	0
Струм фази В	\dot{I}_B	$jx_{2\text{рез}} \dot{I}_{A1}$
Струм фази С	\dot{I}_C	$a^2 \dot{I}_{A1} - a \dot{I}_{A1}$
Напруга прямої послідовності	\dot{U}_{A1}	$jx_{2\text{рез}} \dot{I}_{A1}$
Напруга зворотної послідовності	\dot{U}_{A2}	
Напруга нульової послідовності	\dot{U}_{A0}	0
Напруга фази А	\dot{U}_A	$2 \dot{I}_{A1} jx_{2\text{рез}}$
Напруга фази В	\dot{U}_B	$-\dot{I}_{A1} jx_{2\text{рез}}$
Напруга фази С	\dot{U}_C	$-\dot{I}_{A1} jx_{0\text{рез}}$

Таблиця 9.4. – Розрахункові вирази для визначення симетричних складових
для однофазного КЗ

Розрахункові величини і їх позначення		Вид короткого за- микання
		Однофазне
Струм зворотної послідовності	\dot{I}_{A2}	\dot{I}_{A1}
Струм нульової послідовності	\dot{I}_{A0}	\dot{I}_{A1}
Струм фази А	\dot{I}_A	$3 \dot{I}_{A1}$
Струм фаз В і С	$\dot{I}_B = \dot{I}_C$	0
Напруга прямої послідовності	\dot{U}_{A1}	$j(x_{0\text{pez}} + x_{2\text{pez}}) \dot{I}_{A1}$
Напруга зворотної послідовності	\dot{U}_{A2}	$-jx_{2\text{pez}} \dot{I}_{A1}$
Напруга нульової послідовності	\dot{U}_{A0}	$-jx_{0\text{pez}} \dot{I}_{A1}$
Напруга фази А	\dot{U}_A	0
Напруга фази В	\dot{U}_B	$\dot{I}_{A1} j[x_{2\text{pez}}(a^2 - a) + x_{0\text{pez}}(a^2 - 1)]$
Напруга фази С	\dot{U}_C	$\dot{I}_{A1} j[x_{2\text{pez}}(a - a^2) + x_{0\text{pez}}(a - 1)]$

Таблиця 9.5 – Розрахункові вирази для визначення симетричних складових для двохфазного КЗ на землю

Розрахункові величини і їх позначення	Вид короткого замикання	
	Двохфазне на землю	
Струм зворотної послідовності	\dot{I}_{A2}	$\dot{I}_{A1} \frac{x_{0\text{рез}}}{(x_{0\text{рез}} + x_{2\text{рез}})}$
Струм нульової послідовності	\dot{I}_{A0}	$\dot{I}_{A1} \frac{x_{2\text{рез}}}{(x_{0\text{рез}} + x_{2\text{рез}})}$
Струм фази А	\dot{I}_A	0
Струм фази В	\dot{I}_B	$\dot{I}_{A1} \left(a^2 - \frac{ajx_{0\text{рез}} + jx_{2\text{рез}}}{j(x_{0\text{рез}} + x_{2\text{рез}})} \right)$
Струм фази С	\dot{I}_C	$\dot{I}_{A1} \left(a - \frac{a^2 jx_{0\text{рез}} + jx_{2\text{рез}}}{j(x_{0\text{рез}} + x_{2\text{рез}})} \right)$
Напруга прямої послідовності	\dot{U}_{A1}	$j \frac{x_{2\text{рез}} \cdot x_{0\text{рез}}}{x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}} \cdot \dot{I}_{A1}$
Напруга зворотної послідовності	\dot{U}_{A2}	$j \frac{x_{2\text{рез}} \cdot x_{0\text{рез}}}{x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}} \cdot \dot{I}_{A1}$
Напруга нульової послідовності	\dot{U}_{A0}	$j \frac{x_{2\text{рез}} \cdot x_{0\text{рез}}}{x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}} \cdot \dot{I}_{A1}$
Напруга фази А	\dot{U}_A	$3j \frac{jx_{2\text{рез}} \cdot x_{0\text{рез}}}{x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}}$
Напруга фази В	\dot{U}_B	0
Напруга фази С	\dot{U}_C	0

ЗАНЯТТЯ 10. Визначення діючого значення періодичної складової струму в заданому перетині й напруги в заданому вузлі для моменту часу t , побудова векторних діаграм

1. Взяти значення симетричних складових струмів і напруг у точці несиметричного КЗ в момент часу t з попереднього заняття.

2. Розгортаючи по черзі схеми прямої, зворотної і нульової послідовностей знайти складові струмів у перерізі $F-F$ і складові напруг в точці “ M ”.

Якщо трансформатор, за яким розташовано точку “ M ” має схему з’єднання обмоток $Y_0/\Delta - 11$, то вектори напруги прямої послідовності повинні бути повернені на 30° проти ходу годинної стрілки, а вектори напруги зворотної послідовності – на 30° за ходом годинникової стрілки.

3. Просумувавши комплекси симетричних складових струмів і напруг, знайти фазні струми в перерізі $F-F$ і фазні напруги в точці “ M ”.

4. Фазні струми в перерізі $F-F$ визначаються геометричним підсумовуванням симетричних складових струмів, при цьому вектор струму прямої послідовності направити за речовинною віссю.

5. Фазні напруги в точці “ M ” визначаються геометричним підсумовуванням симетричних складових усіх послідовностей, при цьому вектор напруги прямої послідовності направити мнимою віссю. Вказати масштаби, використані при побудові векторних діаграм.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. - М.: Энергоатомиздат., 1987. - 648с.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. - М.: Энергия, 1970. - 520с.
3. Руководящие указания по релейной защите. Расчёты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. - М.: Энергия, 1979. - 152с.
4. Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред.Б.Н. Неклепаева. - М.: Изд-во НЦЭНАС, 2004. - 152с.
5. Винославский В.Н., Пивняк Г.Г. и др. Переходные процессы в системах электроснабжения. - М.: Энергоатомиздат., 2003. - 597с.
6. Букович Н.В., Міркевич Г.Н. Розрахунок струмів короткого замикання. - К.: НМК ВО, 1991. - 224с.
7. Государственный стандарт СССР. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. - М.: Изд-во стандартов, 1989. - 40с.
8. Блок В.М. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей вузов. - М.: Высш. шк., 1990. - 383с.
9. Черемісін М.М. Перехідні процеси в системах електропостачання. - Харків: Факт, 2005. - 176 с.

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни “Перехідні процеси в енергетичних системах” (для студентів 3, 4 курсів денної та 4 курсу заочної форм навчання спеціальності 6.09 06 03 - “Електротехнічні системи електроспоживання” та 6.05 07 01 - “Електротехніка та електротехнології”).

Укладачі: Оксана Миколаївна Довгалюк,
Дмитро Миколайович Калюжний,
Галина Миколаївна Сердюкова,
Михайло Федорович Піскурьов,
Тетяна Віталіївна Блощенко.

Відповідальний за випуск: О.Г. Гриб

Редактор: З.М. Москаленко

Коректор: З.І. Зайцева

План 2007, поз. 141-М

Підп. до друку 23.07.08	Формат 60x84 1/16.	Папір офісний.
Друк на ризографі	Умовн.-друк. арк. 2,5	Обл.-вид. арк. 3
Замовл. №	Тираж 300 прим.	

61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції,12
Сектор оперативної поліграфії ІОЦ ХНАМГ
61002, Харків, вул. Революції,12